

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

Verfahren zur Verzeichnungskorrektur in einer
mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage
=====

BACKGROUND OF THE INVENTION

1. Field of the invention

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Korrektur bestimmter Arten der Verzeichnung in einem Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage.

2. Description of Related Art

Bei der Herstellung hochintegrierter elektrischer Schaltkreise und anderer mikrostrukturierter Bauelemente werden auf ein geeignetes Substrat, bei dem es sich beispielsweise um einen Silizium-Wafer handeln kann, mehrere strukturierte Schichten aufgebracht. Zur Strukturierung der Schichten werden diese zunächst mit einem Photolack bedeckt, der für Licht eines bestimmten Wellenlängenbereiches, z.B. Licht im tiefen (DUV, *deep ultraviolet*) oder extremen (EUV, *extreme ultraviolet*) ultravioletten Spektralbereich, empfindlich ist. Anschließend wird der so beschichtete Wafer in einer Projektionsbelichtungsanlage belichtet. Dabei wird ein Muster aus Strukturen, das sich auf einem Retikel befindet, mit Hilfe eines Projektionsobjektivs auf den Photolack abgebildet. Da der Ab-

bildungsmaßstab dabei im allgemeinen kleiner als 1 ist, werden derartige Projektionsobjektive häufig auch als Reduktionsobjektive bezeichnet.

Nach dem Entwickeln des Photolacks wird der Wafer einem ~~5~~ Ätz- oder Abscheideprozeß unterzogen, wodurch die oberste Schicht entsprechend dem Muster auf der Maske strukturiert wird. Der noch verbliebene Photolack wird dann von den verbleibenden Teilen der Schicht entfernt. Dieser Prozeß wird so oft wiederholt, bis alle Schichten auf dem
10 Wafer aufgebracht sind.

Eines der im Vordergrund stehenden Ziele bei der Entwicklung mikrolithographischer Projektionsbelichtungsanlagen besteht darin, Strukturen mit zunehmend kleineren Abmessungen auf dem Wafer erzeugen zu können, um auf diese
15 Weise die Integrationsdichte der herzustellenden Bauelemente zu erhöhen. Ein möglicher Weg zu diesem Ziel besteht darin, durch die Korrektur von Abbildungsfehlern die Abbildungsqualität des Projektionsobjektivs zu verbessern.

20 Die Ursachen für Abbildungsfehler in Projektionsobjektiven sind vielfältig. Besonders schwierig zu korrigieren sind häufig solche Abbildungsfehler, die auf Material- oder Fertigungsfehler zurückgehen. Gleiches gilt für Abbildungsfehler, die durch erst während des Betriebes auf-
25 tretende Veränderungen der in dem Projektionsobjektiv enthaltenen optischen Elemente verursacht werden. Dabei

mverä
urch
rojek
achse
ind d
wirke

bbil-
t mar
bjekt
le mi
bgebi

ärfe
kt

ig ve
t ei
it-
ene
an
ie
se
die

er-
fach
er

kann es sich beispielsweise um vorübergehende Formveränderungen handeln, die aus der lokalen Erwärmung durch das energiereiche Projektionslicht resultieren. Das Projektionslicht kann auch unmittelbar mit dem Material wechselwirken, aus dem die optischen Elemente bestehen, und darin z.B. dauerhafte Veränderungen der Brechzahl bewirken.

Ein häufig in Projektionsobjektiven auftretender Abbildungsfehler ist die Verzeichnung. Darunter versteht man ganz allgemein den Effekt, daß Strukturen in der Objektebene eines abbildenden optischen Systems nicht alle mit dem gleichen Abbildungsmaßstab auf die Bildebene abgebildet werden. Dies beeinträchtigt zwar nicht die Schärfe des Bildes, führt aber dazu, daß das Bild dem Objekt nicht mehr im geometrischen Sinne ähnlich ist.

Bei der mathematischen Beschreibung der Verzeichnung vergleicht man im allgemeinen das verzeichnete Bild mit einem Sollbild. Für einzelne Bildpunkte wird dann ermittelt, inwieweit die tatsächliche Lage in der Bildebene von der Sollage abweicht. Diese Abweichungen kann man beispielsweise durch Vektoren beschreiben, welche die Richtung und den Betrag der Abweichung angeben. Diese Vektoren vermitteln dann ein anschauliches Bild für die Verzeichnung.

Mit Hilfe der Verzeichnungsvektoren lassen sich unterschiedliche Arten der Verzeichnung auf besonders einfache Weise beschreiben. Zunächst kann man zwischen linearer

Verzeichnung, quadratischer Verzeichnung und Verzeichnung
höherer Ordnungen unterscheiden. Bei einer linearen Ver-
zeichnung nimmt der Betrag der Verzeichnungsvektoren li-
near zu, je weiter man sich von einem bestimmten Bezugs-
5 punkt, der zum Beispiel in der Mitte des Bildfeldes lie-
gen kann, entfernt. Bei einer quadratischen Verzeichnung
hängt der Betrag der Verzeichnungsvektoren vom Produkt
zweier Lagekoordinaten ab, z.B. x^2 , y^2 oder xy . Entspre-
chendes gilt für Verzeichnungen höherer Ordnung.

- 10 Außerdem kann man die Verzeichnung nach ihren Symmetrie-
eigenschaften bezüglich einer Symmetrieebene des Projek-
tionsobjektivs differenzieren, die im allgemeinen auch
durch die Mitte des Bildfeldes verläuft und dieses in
zwei spiegelsymmetrische Hälften unterteilt. So können
15 die Verzeichnungsvektoren beispielsweise derart symme-
trisch bezüglich dieser Symmetrieebene angeordnet sein,
daß sie bei einer gedachten Drehung des Projektionsobjek-
tivs um 180° wieder in sich selbst übergehen. Eine linea-
re Verzeichnung mit einer solchen zweizähligen Symmetrie
20 wird auch als Anamorphismus bezeichnet. Anschaulich läßt
sich der Anamorphismus als Abbildungsfehler deuten, bei
dem der Abbildungsmaßstab in zwei zueinander senkrechten
Richtungen unterschiedlich ist. Dies führt zu einer Ver-
zerrung des Bildes, bei der beispielsweise ein Kreis als
25 Ellipse abgebildet wird. Unter den Verzeichnungen mit be-
sonderen Symmetrieeigenschaften gibt es neben den symme-
trischen Verzeichnungen noch antisymmetrische Verzeich-
nungen.

Bei den quadratischen Verzeichnungen kann man ebenfalls unterscheiden zwischen symmetrischen und antisymmetrischen Verzeichnungen bezüglich der Symmetrieebene des Projektionsobjektivs. Außerdem differenziert man je nach
5 den Richtungen der Verzeichnungsvektoren in einem polaren, zur optischen Achse zentrierten Koordinatensystem weiter in sagittale und tangentiale Verzeichnung.

Generell kommen als Maßnahmen zur Korrektur von Abbildungsfehlern beispielsweise Lageveränderungen einzelner
10 optischer Elemente mit Hilfe von Manipulatoren in Betracht. Derartige an sich bekannte Manipulatoren ermöglichen es insbesondere, optische Elemente entlang der optischen Achse oder auch senkrecht dazu zu verschieben, sie um die optische Achse herum zu verdrehen oder senkrecht
15 dazu verkippen. Auch eine gezielte Verbiegung von optischen Elementen ist vorgeschlagen worden.

Zur Korrektur speziell der Verzeichnung in Projektionsobjektiven ist es bekannt, einzelne darin enthaltene optische Elemente um eine zur optischen Achse senkrechte
20 Kippachse zu verkippen oder sie bezüglich der optischen Achse zu dezentrieren. Unter Dezentrierung versteht man eine translatorische Verlagerung des betreffenden optischen Elements in einer senkrecht zur optischen Achse angeordneten Ebene. Auch eine Deformation einzelner optischer
25 Elemente ist zur Korrektur möglich.

Bestimmte Arten der Verzeichnung, nämlich ein Fehler des Abbildungsmaßstabes sowie die quadratische Verzeichnung, lassen sich bei doppelt telezentrischen Projektionsobjektiven nicht durch eine Lageveränderung des Retikels korrigieren. Solche Korrekturen sind nur möglich, wenn ein oder mehrere optische Elemente innerhalb des Projektionsobjektivs in ihrer Lage verändert werden. Um beispielsweise eine tangentiale und eine sagittale Verzeichnung unabhängig voneinander zu korrigieren, müssen mindestens zwei Manipulatoren vorhanden sein, die die erforderlichen Lageveränderungen erzeugen. Diese Manipulatoren sind konstruktiv sehr aufwendig und tragen deswegen erheblich zu den Kosten des Projektionsobjektives bei, da sie eine hohe Stellgenauigkeit über einen relativ großen Verfahrensweg hinweg gewährleisten müssen. Nachteilig ist in diesem Zusammenhang ferner, daß durch die Lageveränderung von optischen Elementen in der Regel andere Abbildungsfehler erzeugt werden, die weitere Korrekturmaßnahmen nach sich ziehen.

20 SUMMARY OF THE INVENTION

Aufgabe der Erfindung ist es deswegen, Verfahren zur Korrektur bestimmter Arten der Verzeichnung in einem Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage anzugeben, die besonders wenige und einfach aufgebauten Manipulatoren erfordern.

Gelöst wird diese Aufgabe gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung durch ein Verfahren, das ein objektseitig nicht telezentrisches Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage voraussetzt, dessen
5 Bildfeld außeraxial angeordnet ist. Mit dieser Projektionsbelichtungsanlage ist ein in einem Retikel enthaltenes Muster auf einem Träger einer lichtempfindlichen Schicht abbildbar. Zur Korrektur einer im wesentlichen linearen Verzeichnung mit zweizähliger Symmetrie (Anamorphismus)
10 wird das Retikel um eine Kippachse verkippt, die zumindest annähernd senkrecht zu einer optischen Achse des Projektionsobjektives und vorzugsweise auch zu einer Scanrichtung angeordnet ist, entlang derer das Retikel während einer Projektion gegenüber dem Projektionsobjektiv mit einer ersten Relativgeschwindigkeit verfahren
15 wird.

Als objektseitig telezentrisch bezeichnet man Abbildungssysteme, deren Eintrittspupille zumindest näherungsweise im Unendlichen liegt. Ein objektseitig telezentrisches
20 Projektionsobjektiv hat deswegen die Eigenschaft, daß kleinere Verlagerungen des Objekts entlang der optischen Achse aus der Objektebene heraus die Abbildung nur relativ geringfügig verschlechtern.

Die Erfindung beruht auf der Überlegung, daß eine derartige Verkipfung des Retikels um eine zur optischen Achse
25 senkrechte Achse für den Fall, daß das Projektionsobjektiv objektseitig nicht telezentrisch ist, eine kompensie-

rende Verzeichnung erzeugt, die quadratisch und symmetrisch ist. Innerhalb des kleinen außeraxialen Feldbereichs in der Bildebene gleicht diese kompensierende Verzeichnung, zumindest nach einer geeigneten Dezentrierung des Wafers in der Bildebene, hinsichtlich der Beträge und
5 Richtungsverteilung der Verzeichnungsvektoren der zu korrigierenden Verzeichnung in hohem Maße. Man kann somit durch Verkippen des Retikels einen Abbildungsfehler korrigieren, der bei objektseitig telezentrischen Projektionsobjektiven oder Projektionsobjektiven mit axial zentriertem Feldbereich allein durch eine kleine Lageveränderung des Retikels nicht korrigierbar wäre.
10

Diese Möglichkeit der Verzeichnungskorrektur kann somit die Erwägungen beeinflussen, ob man das Projektionsobjektiv objektseitig telezentrisch oder nicht telezentrisch
15 auslegt und ob ein axiales oder außeraxiales Bildfeld genutzt werden soll.

Objektseitig nicht telezentrische Projektionsobjektive, die in einem Retikel enthaltene Muster auf einen außeraxialen Feldbereich in der Bildebene abbilden, sind allerdings bei rein reflektiven Projektionsobjektiven die Regel. Derartige Projektionsobjektive sind meist für Wellenlängen ausgelegt, die im extremen ultravioletten Spektralbereich (EUV) liegen und z.B. etwa 13 nm betragen.
20 Bei EUV-Projektionsbelichtungsanlagen sind die Projektionsobjektive in der Regel deswegen nicht telezentrisch, weil das Retikel nicht durchleuchtet werden kann, sondern
25

schräg von der Seite her von einem Projektionslichtbündel beleuchtet wird. Die Erfindung ist somit besonders vorteilhaft in derartigen EUV-Projektionsbelichtungsanlagen einsetzbar.

5 Durch diese verhältnismäßig einfache Maßnahme, nämlich die Verkipfung des Retikels um eine zur optischen Achse senkrechte Achse, kann man eine erhebliche Verminderung eines die Abbildungsqualität charakterisierenden Meritwertes erzielen, wie weiter unten im einzelnen dargelegt
10 wird. Diese Verminderung kann bei einem praktischen Ausführungsbeispiel 56% betragen.

Eine nochmalige deutliche Herabsetzung der anamorphotischen Verzeichnung erhält man dann, wenn man zusätzlich zu der Verkipfung von Retikel und Wafer auch noch den Ab-
15 bildungsmaßstab der Optik variiert. Mit dieser Maßnahme ist ein Herabsetzen des Meritwertes in einem Beispiel bis herab zu etwa 25% des Ausgangswertes möglich.

Alternativ oder zusätzlich kann durch Verändern der Lage und/oder der Orientierung einer oder mehrerer der Kompo-
20 nenten der Projektionsbelichtungsanlage, welche zu der Verkipfung von Retikel und ggf. Wafer hinzukommt, die Verzeichnung nochmals herabgesetzt werden. Unter den Komponenten der Projektionsbelichtungsanlage sollen hier die abbildenden Elemente des Objektivs (Spiegel), aber auch
25 das Retikel und der Wafer verstanden werden.

Derartige Lageänderungen sind bevorzugt eine Verschiebung parallel zur optischen Achse, ein Bewegen in Scanrichtung und ein Kippen um eine Achse, die senkrecht auf der optischen Achse und senkrecht auf der Scanrichtung steht.

5 Wenn das Retikel um eine zur optischen Achse senkrechten Achse gekippt wird, so führt dies auch zu einer Verkip-
pung der Bildebene, wobei deren Kippwinkel um den Abbil-
dungsmaßstab herabgesetzt ist. Daher ist es bevorzugt,
wenn der Wafer in die verkippte Bildebene überführt wird,
10 indem der Wafer um eine weitere Kippachse verkippt wird,
die parallel zu der Kippachse verläuft, um die das Reti-
kel verkippt wird.

Weitere Weiterbildungen der Erfindung sind dadurch ge-
kennzeichnet, daß das Objektiv mindestens einen und noch-
15 mals vorzugsweise mindestens sechs Spiegel aufweist,
nochmals vorzugsweise ein nur Spiegel umfassendes Objek-
tiv ist. Nimmt man Kompensationsbewegungen für eine Mehr-
zahl der Komponenten des Objektivs vor, kann man die Me-
ritfunktion für die Verzeichnung nochmals verbessern. Al-
20 lerdings bringen eine vierte, fünfte und sechste Kompen-
sationsbewegung nur noch kleinere Beiträge zur Reduktion
der Meritfunktion.

Eine Weiterbildung der Erfindung ist dadurch gekennzeich-
net, daß der Kippwinkel des Retikels, gegebenenfalls der
25 Kippwinkel des Wafer und nochmals gegebenenfalls zusätz-
lich Kompensationsbewegungen von Komponenten des Objek-

tivs durch Minimierung einer Meritfunktion erhalten werden, welche auf der Basis von einer oder mehr der nachstehenden Größen ermittelt wird: Verzeichnung, Bildfeldwölbung, Koma, sphärische Aberration, Astigmatismus, Maßstabsfehler des Objektivs.

Gemäß einem anderen Aspekt der Erfindung wird eine zu einer Symmetrieebene des Projektionsobjektivs im wesentlichen antisymmetrische quadratische Verzeichnung in einem außeraxialen Feldbereich einer Bildebene eines Projektionsobjektives korrigiert, indem das Retikel und/oder der Träger der lichtempfindlichen Schicht um eine Drehachse verdreht wird bzw. werden, die zumindest annähernd parallel zu einer optischen Achse des Projektionsobjektives angeordnet ist.

Durch eine derartige Drehung des Retikels und/oder des Trägers um eine zu einer optischen Achse parallele Drehachse wird eine antisymmetrische lineare Verzeichnung erzeugt. In einem kleinen außeraxialen Feldbereich der Bildebene ist, zumindest nach einer geeigneten Dezentrierung des Wafers in der Bildebene, eine bereits vorhandene antisymmetrische quadratische Verzeichnung, und zwar sowohl die tangential als auch die sagittale Verzeichnung, einer durch Verdrehen des Retikels und/oder des Wafers erzeugten antisymmetrischen linearen Verzeichnung sehr ähnlich. Dies erlaubt es, durch Manipulation des Retikels einen Abbildungsfehler zu korrigieren, der bei einem objektseitig telezentrischen Projektionsobjektiv mit axia-

lem Feldbereich nur durch Manipulationen der in dem Projektionsobjektiv enthaltenen optischen Elemente zu korrigieren wäre. Die oben im Zusammenhang mit der Korrektur des Anamorphismus genannten Vorteile gelten hier entsprechend.

Dabei ist es im übrigen gleichgültig, ob nur das Retikel, nur der Wafer oder aber beide Komponenten um zur optischen Achse parallele Achsen verdreht werden.

Vorteilhaft ist hierbei insbesondere, daß man mit nur einem einzigen Manipulator, der die Verdrehung des Retikels oder des Wafers um die zur optischen Achse parallele Achse bewirkt, zwei an sich unterschiedliche Bildfehler korrigieren kann, nämlich sowohl die tangentiale als auch die sagittale Verzeichnung.

Vorteilhaft ist ferner bei dieser Art der Verzeichnungskorrektur, daß sich die beschriebene Verdrehung des Retikels und/oder des Wafers lediglich auf die Verzeichnung auswirkt und keine anderen Bildfehler erzeugt, die ihrerseits korrigiert werden müßten.

Günstig ist außerdem die hohe Empfindlichkeit, mit der die Verzeichnung durch eine Verdrehung des Retikels und/oder des Wafers beeinflußt werden kann. Als Folge davon können mit sehr kurzen Stellwegen auch größere Verzeichnungen korrigiert werden. Die hierzu erforderlichen Manipulatoren müssen daher nur über einen vergleichsweise

kurzen Verfahrenweg hochpräzise arbeiten und können deswegen deutlich kostengünstiger bereitgestellt werden. Gegenstand der Erfindung ist deswegen auch ein Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage mit einem Manipulator, mit dem zur Korrektur

5 tungsanlage mit einem Manipulator, mit dem zur Korrektur

~~einer im wesentlichen antisymmetrischen quadratischen~~

Verzeichnung ein Retikel und/oder ein Träger um eine Drehachse verdrehbar ist, die zumindest annähernd parallel zu einer optischen Achse des Projektionsobjektivs angeordnet ist, wobei das Verhältnis zwischen der Korrektur
10 der Verzeichnung und dem von dem Manipulator erzeugten Drehwinkel größer ist als $1,5 \text{ nm}/\mu\text{rad}$.

Bevorzugt ist es, wenn die Drehachse in einer Symmetrieebene des Projektionsobjektives liegt, in der auch die
15 optische Achse verläuft. Dies ist normalerweise auch die Symmetrieebene der Verzeichnung innerhalb des außeraxialen Feldbereichs.

Die oben im Zusammenhang mit der Korrektur des Anamorphismus aufgeführten Weiterbildungen, und zwar insbesondere im Hinblick auf die Möglichkeit, eine weitere
20 Verbesserung der Korrektur durch zusätzliche Lageveränderungen der in dem Projektionsobjektiv enthaltenen optischen Komponenten zu erzielen, gelten hier entsprechend.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

Nachstehend wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert. In dieser zeigen:

- Figur 1 eine schematische Darstellung einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel;
- Figur 2 eine schematische Darstellung eines Projektionsobjektivs, das Teil der in der Figur 1 gezeigten Projektionsbelichtungsanlage ist;
- 10 Figur 3 eine schematische Darstellung der Lagerung eines Schlittens, der in der Projektionsbelichtungsanlage gemäß der Figur 1 zum Halten und Bewegen des Wafers verwendet wird;
- 15 Figur 4 ein Diagramm zur Erläuterung der anamorphotischen Verzeichnung;
- Figur 5 eine schematische Darstellung einer in y-Richtung linear zunehmenden Verzeichnung (Anamorphismus) anhand von Verzeichnungsvektoren im unkorrigierten Zustand;
- 20 Figur 6 eine schematische Darstellung der Beträge der y-Komponente für den in der Figur 5 gezeigten Fall;

Figur 7 eine Darstellung der Verzeichnungsvektoren für die Verzeichnung, die durch eine Verkippung von Retikel und Wafer erzeugt wird, wobei das Retikel um $1 \mu\text{rad}$ um die Achse x_R gedreht wird und zugleich der Wafer in y- und z-Richtung nachgeführt ist;

Figur 8 ein ähnliches Diagramm wie in der Figur 7, wobei das Retikel um $4 \mu\text{rad}$ um die Achse x_R und der Wafer um $1 \mu\text{rad}$ um die Achse x_W gedreht wird und zugleich der Wafer in y- und z-Richtung nachgeführt ist;

Figur 9 ein ähnliches Diagramm wie in der Figur 7, wobei der Spiegel M1 zusätzlich um $0,016 \mu\text{m}$ in z-Richtung verschoben wurde und zugleich der Wafer in y- und z-Richtung nachgeführt ist;

Figur 10 eine der Figur 1 entsprechende schematische Darstellung einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel;

Figur 11 eine Darstellung der Verzeichnungsvektoren in einem Lichtfeld auf dem Wafer bei antisymmetrischer tangentialer Verzeichnung;

Figur 12 eine Darstellung der Verzeichnungsvektoren in einem Lichtfeld auf dem Wafer bei antisymmetrischer sagittaler Verzeichnung;

Figur 13 eine Darstellung der Verzeichnungsvektoren in einem Lichtfeld auf dem Wafer bei Drehung des Wafers um eine zur optischen Achse parallele Achse;

Figur 14 eine Darstellung der Verzeichnungsvektoren bei einer durch Verdrehen eines Spiegels verursachten Verzeichnung;

Figur 15 eine Darstellung der Verzeichnungsvektoren für den in der Figur 14 gezeigten Fall, jedoch nach Korrektur durch Verdrehen des Wafers um eine zur optischen Achse parallele Achse.

15 DESCRIPTION OF PREFERRED EMBODIMENTS

In der Figur 1 ist bei 10 schematisch als Kasten ein Projektionsobjektiv dargestellt. Das Projektionsobjektiv hat eine optische Achse A und umfaßt mehrere Spiegel, wie später unter Bezugnahme auf die Figur 2 noch genauer erläutert wird. Das Projektionsobjektiv 10 dient dazu, ein Muster auf einer in der Figur 1 nach unten weisenden Unterseite eines Retikels 12 auf eine in der Figur 1 nach oben weisende Seite eines Wafers 14 abzubilden. Der Wafer trägt eine Schicht, z.B. einen Photolack, die für Projek-

tionslicht empfindlich ist, dessen Wellenlänge im ultravioletten Spektralbereich (EUV) liegt. Das Projektionslicht wird von einer Beleuchtungseinrichtung 18 (engl. illumination system) aus Synchrotronstrahlung oder Plasmaentladungsquellen (laserinduziert oder durch Gasentladung induziert) erzeugt und kann z.B. eine Wellenlänge von etwa 13 nm haben.

Das von der Beleuchtungseinrichtung 18 erzeugte Projektionslicht wird über einen Umlenkspiegel 16 auf die Unterseite des Retikels 12 geworfen. Dort entsteht ein beleuchteter kreisbogenförmiger Streifen 22. Die Winkelerstreckung des Streifens 22 ist der Breite des abzubildenden Musters auf dem Retikel 12 angepaßt und kann z.B. 60° betragen.

Das von der Unterseite des Retikels 12 reflektierte Projektionslicht durchtritt das Projektionsobjektiv 10 und erzeugt auf der Oberseite des Wafers 14 einen Lichtstreifen 24, der eine Abbildung des auf dem Retikel 12 beleuchteten Streifens 22 ist.

In der Figur 1 ist ein kartesisches Koordinatensystem wiedergegeben, welches nachstehend zur Beschreibung verschiedener Bewegungen verwendet wird. Dabei steht Dx für eine kleine Bewegung in die x-Richtung und Rx eine kleine Drehung um eine zur x-Achse parallele Achse.

Die z-Achse des Koordinatensystems verläuft in Richtung der optischen Achse A vom Retikel 12 zum Wafer 14. Die x-Achse verläuft parallel zur Verbindungslinie der Enden des beleuchteten Streifens 22, die y-Achse senkrecht zum
5 beleuchteten Streifen 22 durch dessen Mitte. Die

y-Richtung stellt zugleich die Richtung dar, in der das Retikel während eines Scanbetriebs gegenüber dem Projektionsobjektiv 10 verfahren wird. Im folgenden wird die y-Richtung daher auch als Scanrichtung bezeichnet.

- 10 Um das gesamte vom Retikel 12 getragene Muster auf den Wafer 14 zu übertragen, ist das Retikel 12 mit einem nur schematisch gezeichneten Antrieb 26 versehen, der das Retikel 12 in der x-y-Ebene in y-Richtung bewegt. Entsprechend ist der Wafer 14 mit einem ebenfalls nur schematisch
15 angedeuteten Antrieb 28 verbunden, welcher den Wafer 14 in einer zur x-y-Ebene parallelen Ebene in y-Richtung bewegt.

- Die Antriebe 26 und 28 werden von einer Steuereinheit 30 gesteuert, welche die beiden Antriebe 26, 28 elektrisch
20 so ansteuert, daß die Geschwindigkeiten der y-Bewegungen des Retikels 12 und des Wafer 14 im Verhältnis des Abbildungsmaßstabes β des Projektionsobjektivs 10 stehen. Die Orientierung der y-Bewegungen ist gegenläufig, da das Projektionsobjektiv 10 eine Bildumkehr erzeugt. Falls das
25 Projektionsobjektiv 10 keine Bildumkehr erzeugt, so sind das Retikel 12 und der Wafer 14 mit gleicher Orientierung entlang der Scanrichtung y zu verfahren.

Die Antriebe 26 und 28 wirken über Kipp-Antriebseinheiten 32, 34 auf das Retikel 12 bzw. den Wafer 14 und sind ihrerseits von einem in der Zeichnung nicht wiedergegebenen Anlagenrahmen her über in z-Richtung wirkende weitere Antriebseinheiten 74 bzw. 72 getragen.

Die Antriebseinheit 32 ist so ausgebildet, daß sie das Retikel 12 um eine Achse x_R verkippen kann. Letztere verläuft parallel zur x-Achse in der Ebene der Unterseite des Retikels 12 (Objektebene) und durch die Mitte des Streifens 22, welchen die Lichtquelle 18 auf dem Retikel 12 erzeugt.

Die Antriebseinheit 34 ist entsprechend so ausgebildet, daß sie den Wafer 14 um eine Achse x_W verschwenken kann, die ebenfalls parallel zur x-Richtung verläuft, in der durch die Oberseite des Wafers 14 vorgegebenen Ebene (Bildebene) liegt und die Mitte des Lichtstreifens 24 schneidet.

Die durch Linien schematisch dargestellten Antriebsverbindungen sind nur logisch zu verstehen. Die in der Zeichnung gezeigten Richtungen der Antriebsverbindungen weichen überwiegend von den wahren Richtungen ab.

Die Antriebseinheiten 32, 34 für die Verkippen des Retikels 12 und des Wafers 14 werden ebenfalls durch die Steuereinheit 30 gesteuert, und zwar derart, daß die Amplituden ihrer Abtriebsbewegungen dem Abbildungsmaßstab

des Projektionsobjektivs 10 entspricht, wobei die Schwenkrichtungen entgegengesetzt sind.

In Abwandlung hierzu können die Kippwinkel der Bewegungsebenen der Schlitten der Antriebe 26 und 28 auch fest durch entsprechendes Justieren von Tragplatten für Reti-
5 kel 12 bzw. Wafer 14 vorgegeben sein, wenn eine Anpassung an geänderte Bedingungen im laufenden Betrieb nicht erforderlich ist.

Die Figur 2 zeigt Einzelheiten des Projektionsobjektivs
10 10, das als abbildende Komponenten sechs Spiegel M1, M2, M3, M4, M5 und M6 umfaßt. Deren Spiegelflächen sind koaxial zu der optischen Achse A angeordnet.

Die Spiegel M1 bis M6 sind in der Zeichnung als zur optischen Achse A rotationssymmetrische Teile wiedergegeben.
15 Es versteht sich, daß diese Spiegel M1 bis M6 in Wirklichkeit nur in den durch den Strahlengang auch wirklich ausgenutzten Bereichen vorhanden sind; die übrigen Bereiche müssen frei bleiben, um den Strahlengang nicht zu behindern. Die Spiegel M1 bis M6 sind auf ihnen zugeordneten Basiselementen B1 bis B6 angeordnet. Diese können neben einer Tragfunktion noch weitere Funktionen erfüllen,
20 z.B. für eine Temperaturstabilisierung der Spiegel M1 bis M6 sorgen und für derartige Funktionen benötigten Bauraum bereitstellen.

Beim hier betrachteten Projektionsobjektiv ist mindestens einer der Spiegel M1 bis M6 um kleine Strecken in z-Richtung und/oder y-Richtung verschiebbar oder um kleine Winkel um eine zur x-Achse parallele Achse kippbar. Für
5 den Spiegel M1 ist ein entsprechendes z-Justiermittel
~~bzw. ein entsprechender z-Aktuator in der Zeichnung bei~~
33 angedeutet.

Die Figur 3 zeigt eine mögliche Ausführungsform für eine Halterung für den Wafer 14. Eine Basisplatte 36 ist an
10 ihren Enden mit Wänden 38 versehen. In den letzteren sind die Enden zweier paralleler seitlicher Führungsstangen 40 festgemacht. Parallel zwischen den beiden Führungsstangen 40 erstreckt sich eine Gewindespindel 42, welche durch einen Getriebemotor 44 angetrieben wird, der auf einer
15 der Wände 38 sitzt.

Auf den Führungsstangen 44 läuft mit vier den Ecken der Basisplatte 36 benachbarten herabhängenden Führungsaugen 46 ein Führungsschlitten 50. Ein bei der Mitte der Basisplatte 36 herabhängendes Gewindeauge 54 läuft auf der Ge-
20 windespindel 42. Die vorgenannten Elemente 36 bis 54 bilden den y-Antrieb 28.

Der Führungsschlitten 50 hat eine Bodenplatte 56 und seitliche Wangen 58, die in ihrer Mitte mit Lageraugen 60 versehen sind. In den Lageraugen 60 sind Stummelwellen 62
25 gelagert, welche fest mit einer Tragplatte 64 verbunden sind. Auf dieser ist der Wafer 14 lösbar durch nicht nä-

her gezeigte Mittel befestigt. Die Lage der Stummelwellen 62 ist so gewählt, daß deren Achse, die unter Betriebsbedingungen parallel zur x-Achse verläuft, in der durch die Oberfläche des Wafers 14 vorgegebenen Ebene liegt.

~~Die wie oben beschrieben schwenkbar gelagerte Tragplatte~~

64 ist über einen Aktuator 66, der ein piezoelektrischer Aktuator sein kann, an der Bodenplatte 56 abgestützt. Die vorgenannten Elemente 56 bis 66 bilden die Rx_w -Antriebs-einheit 34.

- 10 Der Getriebemotor 44, der ein Getriebe und einen Schrittmotor umfassen kann, sowie der Aktuator 66 sind über Steuerleitungen mit der Steuereinheit 30 verbunden. Die vorstehend beschriebenen Komponenten bilden zusammen eine mit 70 bezeichnete Waferstage. Letztere wird in der Projektionsbelichtungsanlage so eingebaut, daß die Führungsstangen 40 parallel zur y-Richtung verlaufen und die Achsen der Stummelwellen 62 in x_w -Richtung verlaufen.
- 15

Man erkennt, daß es auf Grund dieser Anordnung und des beschriebenen Aufbaus der Waferstage 70 möglich ist, den Wafer 14 kontrolliert um die x_w -Achse zu drehen und in y-Richtung zu verschieben.

20

Zusätzlich ist die Basisplatte 36 über den in z-Richtung wirkenden Aktuator 72 an einem rahmenfesten Teil abgestützt, welcher ebenfalls über eine Steuerleitung mit der

Steuereinheit 30 verbunden ist. Dies erlaubt es, den Wafer 14 auch in z-Richtung zu bewegen.

In Abwandlung des oben genannten Ausführungsbeispiels kann man die Drehlagerung der Tragplatte 64 am Führungs-

5 Schlitten 50 auch unter Verwendung von Torsionselementen vornehmen, da die Amplitude der zu erzeugenden Schwenkbewegung um die Achse x_w nur gering ist und z.B. in der Größenordnung einiger μ rad liegen kann.

10 Zum Halten und Bewegen (Translation und Rotation) des Retikels 12 ist eine Retikelstage vorgesehen, die analog zur in Figur 3 gezeigten Waferstage 70 ausgebildet ist und somit nicht nochmals detailliert beschrieben zu werden braucht. Die Antriebseinheit 32 und ihre Lagerung am Anlagenrahmen kann also so erfolgen, wie dies vorstehend
15 für die Antriebseinheit 34 beschrieben ist. Nur hängt das Retikel 12 dann an der Unterseite der Tragplatte 64. Die gesamten Abmessungen und der y-Hub der Antriebseinheit 32 müssen natürlich gemäß dem Abbildungsverhältnis des Projektionsobjektivs 10 größer ausfallen.

20 Die beim lithographischen Belichten von Wafern verwendeten Projektionsobjektive haben unter Einsatzbedingungen in der Regel Verzeichnungen, die herstellungsbedingt oder einsatzbedingt sein können. Einsatzbedingte Verzeichnungen können beispielsweise zurückzuführen sein auf die
25 Wärmeausdehnung von Spiegeln im Betrieb, Deformation von Spiegeln durch mechanische Spannung, wie sie bei der Fer-

tigung, bei der Montage oder durch den Betrieb auf die Spiegel einwirkender Manipulatoren erzeugt werden, oder aber auch durch die Degradation von Spiegeloberflächen im Betrieb.

- 5 - Im folgenden wird angenommen, daß das Projektionsobjektiv
10 eine anamorphotische Verzeichnung erzeugt. Darunter versteht man eine lineare Verzeichnung mit zweizähliger Symmetrie bezüglich eines beliebigen Punktes der Bildebene, wie sie in der Figur 4 gezeigt ist.
- 10 In dem Graphen der Figur 4 sind Verzeichnungsvektoren mit den Komponenten (dx, dy) aufgetragen, die für ausgewählte Punkte (x, y) in der Bildebene der Projektionsobjektivs angeben, in welche Richtung und um welchen Betrag diese Punkte infolge der Verzeichnung verlagert werden. Da das
15 gesamte zur Verfügung stehende Bildfeld in der x- und y-Richtung mehrere Zentimeter mißt, ist die Verzeichnung relativ gesehen zwar relativ gering, da die Bildpunkte höchstens einige Bruchteile von Millimetern infolge der Verzeichnung in der Bildebene verlagert werden. Den hohen
20 Anforderungen an die Abbildungsqualität, die Projektionsbelichtungsanlagen stellen, kann eine solche Abbildung jedoch bereits nicht mehr gerecht werden.

Eine Verzeichnung wird als symmetrisch bezeichnet, wenn für alle Punkte (x, y) im Bildfeld für die Komponenten dx
25 und dy der Verzeichnungsvektoren die folgenden Beziehungen gelten:

$$dx(-x, y) = -dx(x, y)$$

$$dy(-x, y) = dy(x, y)$$

Eine Verzeichnung wird als antisymmetrisch bezeichnet,
wenn für alle Punkte (x, y) im Bildfeld für die Kompen-

5 -ten dx und dy der Verzeichnungsvektoren die folgenden Beziehungen gelten:

$$dx(-x, y) = dx(x, y)$$

$$dy(-x, y) = -dy(x, y)$$

Ist der Feldverlauf keiner dieser Kategorien zuordenbar,
10 so wird die Verzeichnung als unsymmetrisch bezeichnet.

Wird der Verzeichnisvektor in Polarkoordinaten angegeben,
so läßt sich die anamorphotische, d.h. lineare antisymmetrische Verzeichnung durch Verzeichnisvektoren der Form

$$dr = a \cos 2\varphi + b \sin 2\varphi$$

15 $d\varphi = -b \cos 2\varphi + a \sin 2\varphi,$

angeben, wobei dr die Radialkomponente und $d\varphi$ die tangentielle Komponente des Verzeichnisvektors sind. A und B bezeichnen reelle Konstanten des Verzeichnisvektors und φ den Winkel des Polarkoordinatensystems.

20 In der Figur 4 ist erkennbar, daß entlang der x -Richtung und der y -Richtung der Betrag der Verzeichnung, d.h. die Länge der Verzeichnungsvektoren, mit zunehmendem Abstand

vom Ursprung des Koordinatensystems, der auf der optischen Achse A liegt, linear zunimmt. Es handelt sich deswegen um eine lineare Verzeichnung. Erkennbar ist außerdem die zweizählige Symmetrie der Verzeichnung, da die

5 Anordnung der Verzeichnungsvektoren bei einer Drehung des Diagramms um 180° wieder in sich selbst übergeht.

In dem Graphen der Figur 4 ist außerdem der Lichtstreifen 24 eingetragen, der, wie deutlich erkennbar ist, in größerer Entfernung von der optischen Achse A des Projektionsobjektives 10 verläuft.

Im folgenden wird angenommen, daß lediglich die y-Komponente des Verzeichnisvektors linear zunimmt. Die x-Komponente soll dagegen konstant bleiben. Erreichen läßt sich dies beispielsweise mit Hilfe eines (idealen) Manipulators für den Abbildungsmaßstab des Projektionsobjektivs. Für den Lichtstreifen 24 in der Bildebene des Projektionsobjektives 10 erhält man dann die in den Figuren 5 und 6 gezeigten Verhältnisse. Die Figur 5 zeigt die Verzeichnungsvektoren innerhalb des Bildfeldes 24 für 15 ausgewählte Feldpunkte. Da sich die Verzeichnungsvektoren teilweise überlappen, sind in der Figur 6 die Beträge der Verzeichnungsvektoren anhand von Kreisen dargestellt, deren Radius dem Betrag der Verzeichnung in y-Richtung entspricht. Die Nulllinie der Verzeichnung, die man durch 20 Verschieben des Wafers in y-Richtung frei wählen kann, läuft dabei jeweils durch die Mitte des Lichtstreifens 26. Die maximale Verzeichnung beträgt bei diesem Beispiel

2,6 nm, was ein ppm entspricht. In der x-Richtung ist die Verzeichnung, wie bereits erwähnt, null.

Der beleuchtete Streifen 22 auf dem Retikel 12 ist dabei ein zur optischen Achse A konzentrisches Ringsegment mit

5 ~~einem Öffnungswinkel von etwas weniger als 60°, einem~~
mittleren Radius von 138 mm und einer verglichen mit dem Radius kleinen Breite. Damit ergibt sich bei einem Abbildungsmaßstab 1:4 des Projektionsobjektivs 10 ein Radius des Lichtstreifens 24 auf dem Wafer 14 von 34,5 mm.

- 10 Wie bereits erwähnt wurde, kann mit Hilfe eines (idealen) Manipulators für den Abbildungsmaßstab des Projektionsobjektivs jeder beliebige anamorphotische Feldverlauf mit derselben Symmetrie aus dem dargestellten Feldverlauf erzeugt werden. Auf diese Weise nicht zugänglich sind aber
15 bezüglich der y-Achse antisymmetrische Feldverläufe. Typische lineare antisymmetrische anamorphotische Feldverläufe der Verzeichnung sind beispielsweise Scherungen des Bildes. Diese kann man durch Drehen des Retikels oder des Wafers um eine zur optischen Achse des Projektionsobjektivs
20 parallele Achse zumindest teilweise kompensieren.

Anamorphotische Feldverläufe der Verzeichnung treten bei den derzeit gebräuchlichen EUV-Projektionsobjektiven hauptsächlich aus zwei Gründen auf, nämlich Oberflächenfehler der Spiegel und Spiegeldeformationen. Letztere
25 entstehen z.B. dadurch, daß das streifenförmige Projektionslichtbündel zu einer nicht rotationssymmetrischen Er-

wärmung und damit zu einer Deformation feldnaher Spiegel führt. Diese Deformationen führen bei feldnahen Spiegeln üblicherweise zu Abbildungsfehlern mit zweizähliger Symmetrie und damit u.a. auch zum Anamorphismus. Zur Kompensation sind bei Projektionsobjektiven an sich entspre-

chende aktive Deformationen eines Spiegels mit Hilfe von Manipulatoren erforderlich. Zumindest bei objektseitig telezentrischen Projektionsobjektiven gibt es zu dieser relativ aufwendigen Art der Abbildungskorrektur keine
10 echte Alternative.

Bei der oben beschriebenen Projektionsbelichtungsanlage ist das Projektionsobjektiv 10 objektseitig jedoch nicht telezentrisch. Daher kann man durch Verschieben der Lage des Retikels 12 parallel zur optischen Achse A den Abbildungsmaßstab beeinflussen. Wird das Retikel 12 nicht insgesamt parallel entlang der optischen Achse A verschoben, sondern um eine dazu senkrechte Achse verkippt, so führt dies zu einer feldpunktabhängigen Veränderung des Abbildungsmaßstabes. Da diese Abhängigkeit quadratisch bezüglich des Abstandes zwischen einem Feldpunkt auf dem Wafer
20 14 und dem darauf erzeugten Bild der Kippachse ist, erzeugt die Verkipfung insgesamt eine quadratische tangentielle Verzeichnung in der Bildebene. Bei der oben beschriebenen Verkipfung des Retikels 12 um die zur x-Achse
25 parallel Kippachse x_R ist diese Verzeichnung symmetrisch, was weiter unten im Zusammenhang mit einem anderen Ausführungsbeispiel näher erläutert wird.

Da der Lichtstreifen 24 in der y-Richtung nur eine kleine Ausdehnung hat, läßt sich durch die quadratische symmetrische Verzeichnung, die durch Verkippen des Retikels 12 erzeugt wird, bei entsprechend gewähltem Kippwinkel die
5 durch die Spiegeldeformation erzeugte lineare symmetrische Verzeichnung annähernd kompensieren. Hier wird
letztlich die Tatsache ausgenutzt, daß bei Werten von y in der Nähe von 1

$$y \approx y^2$$

10 gilt.

Der näherungsweise lineare symmetrische Verlauf der Verzeichnung, der durch die Verkipfung des Retikels 12 um die x_R -Achse um 1 µrad in dem Lichtstreifen 24 erzeugt wird, ist in der Figur 7 in einer an die Figur 5 angelehnten Darstellung gezeigt. Eine mit der Verkipfung des
15 Retikels 12 einhergehende Defokussierung ist durch eine translatorische Verlagerung des Retikels 12 entlang der optischen Achse A bereits kompensiert. Eine laterale Verschiebung ist durch eine Verlagerung in y-Richtung ausgeglichen.
20

In der Figur 7 ist erkennbar, daß der Betrag der Verzeichnung, der durch die Länge der Pfeile angedeutet ist, annähernd linear in y zunimmt, je weiter man sich von der Bezugsebene entfernt, in der die Verzeichnung infolge
25 translatorischen Verschiebens des Wafers 14 in der x-y-

Ebene Null ist. Diese kippungsbedingt erzeugte Verzeichnung entspricht somit betragsmäßig näherungsweise dem zu korrigierenden Anamorphismus. Bei entsprechender Wahl der Richtung, in der das Retikel 12 verkippt wird, läßt sich sicherstellen, daß die Verzeichnung richtungs-
 5 mäßig im wesentlichen gegenläufig ist, so daß aufgrund der ähnlichen Beträge eine gute Kompensation erzielt wird.

10 **Tabelle 1: Verzeichnung für ausgewählte Feldpunkte bei Verkipfung des Retikels um 1 μ rad.**

x-Koordinate [nm]	y-Koordinate [nm]	dx [nm]	dy [nm]
0.0	33.5	0.0	-0.02
0.0	34.0	0.0	-0.07
0.0	34.5	0.0	-0.12
0.0	35.0	0.0	-0.17
0.0	35.5	0.0	-0.22
13.0	30.9	0.14	0.22
13.0	31.4	0.12	0.18
13.0	32.0	0.10	0.13
13.0	32.5	0.08	0.08
13.0	33.0	0.06	0.03

Der lineare Verlauf der Verzeichnung dy in y-Richtung er-
 15 gibt sich auch aus der nachfolgenden Tabelle 1, in der die Komponenten der Verzeichnungvektoren (dx, dy) für ausgewählte Feldpunkte (x, y) zusammengestellt sind.

In der Figur 7 ist ferner erkennbar, daß durch die Verkipfung Rx_R des Retikels 12 um die Achse x_R noch eine x-Komponente der Verzeichnung entsteht, die nicht für die Korrektur von Anamorphismus verwendet werden kann. Daher
5 ist das Korrekturpotential, welches in einer Verkipfung
des Retikels 12 um die Achse x_R liegt, begrenzt.

Wird das Retikel 12 gekippt, so kippt auch die beste Einstellebene für das Bild, welches auf der Oberseite des
10 Wafers 14 erzeugt wird. Dem kann man dadurch begegnen, daß man auch die den Wafer 14 tragende Tragplatte 64 verkippt, was die oben mit Bezug auf die Figur 3 beschriebene Anordnung erlaubt. Dabei wählt man das Verhältnis zwischen dem Kippwinkel α_W des Wafers 14 zu dem Kippwinkel
15 α_R des Retikels 12 gleich dem Abbildungsmaßstab β des Projektionsobjektivs:

$$\alpha_W = \beta \alpha_R .$$

Ferner wählt man die Abstände Dx_R und Dx_W zwischen den Kippachse x_R bzw. x_W einerseits und der optischen Achse A
20 des Projektionsobjektivs andererseits wie folgt:

$$Dx_R = \beta Dx_W .$$

Die Figur 8 sowie die Tabelle 2 zeigen als Beispiel die Verhältnisse bei Kippung der Retikelstage um einen größeren Winkel als in der Tabelle 1, nämlich 4 μ rad, bei
25 gleichzeitiger Kippung der Waferstage um 1 μ rad.

Oben wurden Grenzen der Kompensation der Verzeichnung durch Verkippen von Retikel und Wafer aufgezeigt. Durch Änderung anderer Parameter des gesamten Abbildungssystems lassen sich aber noch weitere Verbesserungen erzielen. Bezeichnet man verkürzt die Gesamtheit der verschie-

~~denen beweglichen Komponenten der gesamten Projektionsbe-~~
lichtungsanlage (Spiegel, Retikelstage und Waferstage) als "Manipulator", so hat diese eine Vielzahl von veränderbaren Freiheitsgraden. Die Änderungen dieser Frei-
10 heitsgrade wirken sich in Änderungen der Qualität der Abbildung in unterschiedlicher Richtung aus. Für die nachstehende Betrachtung werden berücksichtigt die Verzeichnung, die durch Verzeichnungsvektoren (dx , dy) beschrieben wird, die Bildfeldwölbung oder auch FC (field curva-
15 ture), der Astigmatismus, die Koma und die sphärische Aberration. Denkbar wären aber auch Maßstabsfehler des Projektionsobjektivs.

Aus den verschiedenen Bildfehlern wird unter geeigneter
20 Gewichtung eine Meritfunktion gebildet, die die verschiedenen Abbildungsfehler und damit die Abbildungsqualität des Projektionsobjektivs 10 in einer einzigen Zahl widerspiegelt und die durch dem Fachmann bekannte Verfahren minimiert werden kann.

25 Im Hinblick auf die kompensierenden Verzeichnungen sind neben den schon erwähnten Verkippen von Retikel 12 und Wafer 14 um Parallelen zur x-Achse weitere erfolgversprechende Freiheitsgrade die Verschiebungen der Spiegel M1

bis M6 des in Figur 2 gezeigten Projektionsobjektivs parallel zur z-Achse und y-Achse sowie Verkipnungen dieser Spiegel um zur x-Achse parallele Achsen. Die vorgenannten Freiheitsgrade erhalten die Spiegelsymmetrie des Projektionsobjektivs 10 bezüglich der mit der y-z-Ebene zusammenfallenden Symmetrieebene der gesamten Anordnung.

**Tabelle 2: Verzeichnung für ausgewählte Feldpunkte bei-
Verkipfung des Retikels und des Wafers um
4 µrad**

10

x-Koordinate [nm]	y-Koordinate [nm]	dx [nm]	dy [nm]
0.0	33.5	0.0	-0.06
0.0	34.0	0.0	-0.26
0.0	34.5	0.0	-0.46
0.0	35.0	0.0	-0.67
0.0	35.5	0.0	-0.89
13.0	30.9	0.57	0.89
13.0	31.4	0.48	0.71
13.0	32.0	0.40	0.52
13.0	32.5	0.31	0.32
13.0	33.0	0.23	0.12

Verwendet man die soeben genannten Freiheitsgrade und wird für jede Störung und jeden Freiheitsgrad die Position der Bildebene immer jeweils in die optimale Lage nachgeführt, so erhält man bei Freigabe aller Freiheitsgrade 15 eine Meritfunktion, die nur noch 23,2% des Ausgangswertes

beträgt. Dies ist zu vergleichen mit der Meritfunktion, die durch Kippen des Wafers 14 und des Retikel 12 um die Achse x_W bzw. x_R allein erhalten wird. Durch diese Maßnahme kann man die Meritfunktion auf weniger als 48,5% des Ausgangswertes reduzieren.

Nachdem man schon durch Hinzunahme eines einzigen weiteren Freiheitsgrades zu den Verkippungen von Retikel und Wafer eine zusätzliche Herabsetzung der Meritfunktion um weitere ca. 25% erhält, führt die Hinzunahme eines vierten, fünften oder sechsten Freiheitsgrades nur noch zu unwesentlichen weiteren Verbesserungen.

Untersuchungen zeigen, daß sich als dritter Freiheitsgrad die Verschiebung eines der optischen Elemente des Abbildungssystems in z-Richtung anbietet. Dabei kommt man mit einer Verschiebung des Retikels 12 in z-Richtung dem Ergebnis schon sehr nahe, welches man mit einem idealen Manipulator erreichen würde. Auch mit einer Verschiebung des Spiegels M1 oder des Spiegels M6 in zur z-Achse paralleler Richtung erzielt man sehr gute Ergebnisse.

Die Figur 9 zeigt als Alternative die Verhältnisse bei zusätzlicher Verschiebung des ersten Spiegels M1 in z-Richtung um den Betrag von $0,016 \mu\text{m}$.

Aus den obigen Darlegungen ergibt sich, daß der wesentliche Freiheitsgrad zur Korrektur von Anamorphismus die Kippung des Retikels um die Achse x_R ist.

Bei dem oben beschriebenen Projektionsobjektiv ist das Feld weit von der optischen Achse entfernt. Dieser Umstand ermöglicht es, die Korrektur des Anamorphismus durch Kippen des Retikels durchzuführen. Für eine andere

5 Strahlführung, bei welcher das Feld näher bei der optischen Achse liegt, wird die Korrektur des Anamorphismus schlechter. Ist der Abstand des Feldes nicht größer als seine halbe Ausdehnung in x-Richtung, überwiegt die x-Komponente der Verzeichnung, und das Kippen des Retikels

10 bringt nicht die oben geschilderte gewünschte Korrektur.

Die Figur 10 zeigt ein anderes Ausführungsbeispiel für eine EUV-Projektionsbelichtungsanlage in einer an die Figur 1 angelehnten schematischen Darstellung. Gleiche Teile sind darin mit gleichen Bezugsziffern und einander

15 entsprechende Teile mit um 100 erhöhten Bezugsziffern bezeichnet.

Die in der Figur 10 gezeigte Projektionsbelichtungsanlage unterscheidet sich von der in Figur 1 gezeigten dadurch, daß das Retikel 12 und der Wafer 14 nicht um eine zur x-Richtung parallele Achse, sondern um eine zur z-Richtung

20 parallele Achse z_R bzw. z_W verdrehbar sind. Die beiden Drehachsen z_R und z_W verlaufen dabei jeweils durch die Mitte des Streifens 22 auf dem Retikel 12 bzw. des Lichtstreifens 24 auf dem Wafer 14. Zur Erzeugung der Drehbewegungen des Retikels 12 und des Wafers 14 um die genannten

25 Drehachsen z_R bzw. z_W sind Antriebe 132 bzw. 134 vor-

gesehen, die jeweils mit der Steuereinheit 30 verbunden sind.

Es wird nun angenommen, daß das Projektionsobjektiv 110 eine antisymmetrische quadratische Verzeichnung in der

5 Bildebene erzeugt, in der der Wafer 14 angeordnet ist.

Bei den quadratischen Verzeichnungen differenziert man einerseits nach den Symmetrieeigenschaften, wie sie oben bereits im Zusammenhang mit der linearen Verzeichnung erläutert wurden. Außerdem unterscheidet man je nach Richtung der Verzeichnung tangentiale und sagittale Verzeichnungen. Insgesamt ergeben sich dann vier Fälle der quadratischen Verzeichnung, nämlich symmetrische tangentiale Verzeichnung, symmetrische sagittale Verzeichnung, antisymmetrische tangentiale Verzeichnung sowie antisymmetrische sagittale Verzeichnung. Für diese vier Fälle gelten für die Komponenten (dx, dy) der Verzeichnungsvektoren an den Feldpunkten (x, y) die folgenden Proportionalitätsbeziehungen:

Symmetrische tangentiale Verzeichnung:

20 $dx \sim xy \text{ und } dy \sim y^2$.

Symmetrische sagittale Verzeichnung:

$$dx \sim xy \text{ und } dy \sim -x^2$$

Antisymmetrische tangentiale Verzeichnung:

$$dx \sim x^2 \text{ und } dy \sim xy$$

Symmetrische sagittale Verzeichnung:

$$dx \sim xy \text{ und } dy \sim y^2$$

Die Figuren 11 und 12 zeigen in einem Graphen eine antisymmetrische tangentielle Verzeichnung bzw. eine antisymmetrische sagittale Verzeichnung in dem Lichtstreifen 24 auf dem Wafer 14. Ein ggf. vorhandener Bildversatz wurde dort bereits durch Verschieben des Wafers 14 kompensiert. Der antisymmetrische Verlauf der Verzeichnungsvektoren bezüglich der Symmetrieebene des Projektionsobjektives 110, die durch $x = 0$ gegeben ist, ist in dieser Darstellung gut erkennbar. Ferner wird aus den Figuren 11 und 12 deutlich, daß sich die tangentielle und die sagittale antisymmetrische Verzeichnung in dem kleinen außeraxialen Lichtstreifen 24 nicht wesentlich voneinander unterscheiden.

Um eine derartige Verzeichnung zu korrigieren, wie sie durch ähnliche Einflüsse hervorgerufen werden können, wie sie oben bereits im Zusammenhang mit der linearen Verzeichnung erläutert wurden, wird entweder das Retikel 12 oder der Wafer 14 um die Drehachse z_R bzw. z_W geringfügig mit Hilfe der Antriebseinheiten 132 bzw. 134 gedreht. Daneben ist es auch möglich, sowohl das Retikel 12 als auch den Wafer 14 um die genannten Achsen zu verdrehen.

In der Figur 13 ist ein Lichtfeld 24 gezeigt, wie es bei Abwesenheit einer bereits vorhandenen Verzeichnung durch die Drehung des Wafers 14 um die Achse z_W erzeugt wird.

Wie ein Vergleich mit den Figuren 11 und 12 zeigt, ist die durch eine Verdrehung des Wafers 14 um die Achse z_w erzielbare Verzeichnung einer antisymmetrischen tangentialen oder sagittalen Verzeichnung sehr ähnlich. Dies ist insofern bemerkenswert, als durch eine Drehung des Wafers 14 oder auch der Maske 12 eigentlich eine antisymmetrische lineare Verzeichnung erzeugt wird. In dem schmalen außeraxialen Lichtstreifen 24 nähern sich die beiden Verzeichnungen so an, daß eine gute Kompensation möglich ist.

Grundsätzlich läßt sich eine antisymmetrische tangentiale oder sagittale Verzeichnung auch durch Lageveränderung einzelner optischer Elemente innerhalb des Projektionsobjektives 110 korrigieren. Es hat sich sogar gezeigt, daß die verbleibenden Restfehler bei einigen derartigen Maßnahmen geringer als bei einer Verdrehung des Retikels 12 und/oder des Wafers 14 sind. Warum eine Verdrehung des Retikels 12 und/oder des Wafers 14 dennoch vorteilhaft ist, wird anhand des folgenden konkreten Beispiels erläutert.

Im folgenden wird angenommen, daß der zweite Spiegel M2 infolge eines Montagefehlers innerhalb der x-y-Ebene dezentriert wurde. Die Figur 14 zeigt die Verzeichnung in dem Lichtstreifen 24, die durch diese Deformation hervorgerufen wird. Der Wafer 14 wurde dabei bereits derart entlang der y-Richtung verschoben, daß ein feldkonstanter Anteil der Verzeichnung kompensiert wurde. Wie ein Ver-

gleich mit der Figur 12 zeigt, handelt es sich bei der durch die Deformation des Spiegels M4 erzeugten Verzeichnung im wesentlichen um eine antisymmetrische sagittale Verzeichnung, die einer Korrektur durch Verdrehen des Retikels 12 und/oder des Wafers 14 zugänglich ist.

Die Figur 15 zeigt für dieses Beispiel die Verzeichnung in dem Lichtstreifen 24 nach einer Drehung des Wafers 14 um die Achse z_w . Wie ein Vergleich mit der Figur 14 zeigt, ist der verbleibende Restfehler, der durch die Länge der Verzeichnisvektoren bestimmt wird, sehr klein.

Zum Vergleich dieser Art der Korrektur mit anderen Korrekturmöglichkeiten ist in der Tabelle 3 aufgetragen, wie sich die unterschiedlichen Korrekturmöglichkeiten hinsichtlich des verbleibenden Restfehlers, der erzielten Korrektur, der erforderlichen Einstellwege, des Verhältnisses zwischen der erzielten Korrektur und dem Einstellweg voneinander unterscheiden. Als Korrektur wird hierbei das Maß verstanden, um das der Betrag der Verzeichnung durch die entsprechende Korrekturmaßnahme verringert wird. Bei den alternativen Korrekturmöglichkeiten handelt es sich im einzelnen um eine Drehung des ersten Spiegels M1 um Parallele zur y-Achse, eine Drehung des Retikels 12 um Parallele zur y-Achse sowie um eine Drehung des zweiten Spiegels M2 um Parallele zur y-Achse.

Aus der Tabelle 3 geht hervor, daß die Drehung des Wafers 14 um die Achse z_w im Vergleich zu den anderen genannten

Korrekturmaßnahmen zwar die schlechteste Korrektur der quadratischen Verzeichnung ermöglicht. Dafür ist jedoch das Verhältnis zwischen der Korrektur und dem erforderlichen Einstellweg außerordentlich günstig. Dies erlaubt

5 den Einsatz vergleichsweise preiswerter Manipulatoren, da die geförderte Linearität des Einstellweges nur über einen kleinen Stellbereich hinweg eingehalten werden muß.

Tabelle 3: Vergleich unterschiedlicher Korrekturmaßnahmen

Korrekturmaßnahme	Restfehler	Erzielte Korrektur	Einstellweg	Verhältnis Korrektur/Einstellweg
Drehung des Wafer 14 um Parallele zur z-Achse	0.21nm	0.79nm	0.30µrad	2.6nm/µrad
Drehung des ersten Spiegels M1 um Parallele zur y-Achse	0.06nm	0.94nm	1.31µrad	0.7nm/µrad
Drehung des Retikels 12 um Parallele zur y-Achse	0.05nm	0.95nm	2.82µrad	0.3nm/µrad
Drehung des zweiten Spiegels M2 um Parallele zur y-Achse	0.04nm	0.96nm	0.92µrad	1.0nm/µrad

- 10 Ein weiterer Vorteil bei der hier beschriebenen Korrektur durch Verdrehen der Maske 12 und/oder des Wafers 14 um eine zur optischen Achse A parallele Achse liegt darin begründet, daß sich diese Verdrehung ausschließlich auf die Verzeichnung auswirkt und ansonsten keine zusätzli-
- 15 chen Bildfehler einführt. Bei den anderen möglichen Korrekturmöglichkeiten hingegen wird die antisymmetrische quadratische Verzeichnung zwar ebenso gut oder sogar noch

besser korrigiert, jedoch werden dabei gleichzeitig zusätzliche Abbildungsfehler erzeugt, die im allgemeinen ebenfalls korrigiert werden müssen. Dies erfordert im allgemeinen eine sehr große Zahl teurer Manipulatoren,

5 mit denen die optischen Elemente innerhalb des Projektionsobjektives 110 in ihrer Lage verändert oder deformiert werden können.

Falls der verbleibende Restfehler der Verzeichnung dennoch nicht toleriert werden kann, so läßt sich die Verzeichnung durch Hinzunahme eines zweiten Freiheitsgrades weiter verringern. In Betracht kommt hierzu beispielsweise eine zusätzliche Verkipfung des zweiten Spiegels M2 um eine Parallele zur x-Achse, eine Verkipfung des ersten
15 Spiegels M1 um eine Parallele zur y-Achse oder eine Verkipfung des Retikels 12 um eine Parallele zur y-Achse. Die durch die Hinzunahme eines zweiten Freiheitsgrades erzielbare Verringerung des Restfehlers ist allerdings relativ klein und geht im allgemeinen nicht wesentlich
20 über etwa 15% hinaus. In den meisten Fällen wird diese Verbesserung den zusätzlichen Aufwand für einen weiteren Manipulator nicht rechtfertigen.

Patentansprüche

=====

1. Ein Verfahren zur Korrektur einer im wesentlichen
linearen Verzeichnung mit zweizähliger Symmetrie in
5 einem außeraxialen Feldbereich einer Bildebene eines ob-
jektseitig nicht telezentrischen Projektionsobjektivs,
das Teil einer mikrolithographischen Projektionsbelich-
tungsanlage ist, mit der ein in einem Retikel enthaltenes
Muster auf einen Träger einer lichtempfindlichen Schicht
10 abbildbar ist, während das Retikel gegenüber dem Projek-
tionsobjektiv mit einer ersten Relativgeschwindigkeit
entlang einer Scanrichtung verfahren wird, umfassend den
Schritt des Verkippens des Retikels zur Korrektur der
Verzeichnung um eine Kippachse, die zumindest annähernd
15 senkrecht zu einer optischen Achse des Projektionsobjek-
tivs und der Scanrichtung angeordnet ist.
2. Das Verfahren nach Anspruch 1, bei dem ein Wafer
gegenüber dem Projektionsobjektiv mit einer zweiten
Relativgeschwindigkeit entlang der Scanrichtung verfahren
20 wird, wobei das Verhältnis zwischen der ersten Verfahrges-
windigkeit und der zweiten Verfahrgeschwindigkeit
durch den Abbildungsmaßstab des Projektionsobjektivs
vorgegeben ist.
3. Das Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Kippachse
25 durch einen Bereich des Retikels verläuft, der Pro-
jektionslicht ausgesetzt ist.

4. Das Verfahren nach Anspruch 3, bei dem die Kippachse durch die Mitte des Bereichs verläuft, der Projektionslicht ausgesetzt ist.

5. Das Verfahren nach Anspruch 2, bei dem zusätzlich

5 der Wafer um eine weitere Kippachse verkippt wird, die parallel zu der Kippachse verläuft, um die das Retikel verkippt wird.

6. Das Verfahren nach Anspruch 5, bei dem das Retikel und der Wafer um Kippwinkel verdreht werden, deren

10 Verhältnis betragsmäßig im wesentlichen gleich dem Abbildungsmaßstab des Projektionsobjektivs ist.

7. Das Verfahren nach Anspruch 5, bei dem die Kippachsen, um die das Retikel und der Wafer verkippt werden,

den, von der optischen Achse Abstände haben, deren Ver-

15 hältnis betragsmäßig im wesentlichen gleich dem Abbildungsmaßstab des Projektionsobjektivs ist.

8. Das Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Träger zur Korrektur eines feldkonstanten Anteils der Verzeichnung in der Bildebene verschoben wird.

20 9. Das Verfahren nach Anspruch 1, bei dem zusätzlich mindestens ein optisches Element des Projektionsobjektivs in seiner räumlichen Lage verändert wird.

10. Das Verfahren nach Anspruch 9, bei dem das mindestens eine optische Element parallel zu der optischen Achse verschoben wird.

11. Das Verfahren nach Anspruch 9, bei dem das mindestens eine optische Element translatorisch in einer zur optischen Achse senkrechten Ebene verschoben wird.

12. Das Verfahren nach Anspruch 9, bei dem das mindestens eine optische Element in der Scanrichtung verschoben wird.

10 13. Das Verfahren nach Anspruch 9, bei dem das mindestens eine optische Element senkrecht zur Scanrichtung verschoben wird.

14. Das Verfahren nach Anspruch 9, bei dem das mindestens eine optische Element um eine Kippachse ver-
15 kippt wird, die zumindest annähernd senkrecht zu der optischen Achse des Projektionsobjektivs und der Scanrichtung angeordnet ist.

15. Das Verfahren nach Anspruch 9, bei dem das mindestens eine optische Element um eine Kippachse ver-
20 kippt wird, die die zumindest annähernd senkrecht zu der optischen Achse des Projektionsobjektivs und parallel zu der Scanrichtung angeordnet ist.

16. Das Verfahren nach Anspruch 1, bei dem zusätzlich der Abbildungsmaßstab des Projektionsobjektivs verändert wird.

17. Das Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Projektionsobjektiv ausschließlich Spiegel als abbildende optische Elemente hat.

18. Das Verfahren nach Anspruch 17, bei dem das Projektionsobjektiv mindestens vier Spiegel hat.

19. Ein Verfahren zur Korrektur einer im wesentlichen antisymmetrischen quadratischen Verzeichnung in einem außeraxialen Feldbereich einer Bildebene eines Projektionsobjektivs, das Teil einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage ist, mit der ein in einem Retikel enthaltenes Muster auf einen Träger einer lichtempfindlichen Schicht abbildbar ist, umfassend den Schritt des Verdrehens des Retikels, des Trägers oder beider zur Korrektur der Verzeichnung um eine Drehachse, die zumindest annähernd parallel zu einer optischen Achse des Projektionsobjektivs angeordnet ist.

20. Das Verfahren nach Anspruch 19, bei dem die Drehachse durch den außeraxialen Feldbereich hindurch verläuft.

21. Das Verfahren nach Anspruch 20, bei dem die Drehachse in einer Symmetrieebene des Projektionsobjektivs liegt, in der auch die optische Achse verläuft.

22. Das Verfahren nach Anspruch 19, bei dem der Träger ~~zur Korrektur eines feldkonstanten Anteils der Ver-~~
zeichnung in der Bildebene verschoben wird.

23. Das Verfahren nach Anspruch 19, bei dem zusätzlich mindestens ein optisches Element des Projektionsobjektivs in seiner räumlichen Lage verändert wird.

10 24. Das Verfahren nach Anspruch 23, bei dem das mindestens eine optische Element parallel zu der optischen Achse verschoben wird.

25. Das Verfahren nach Anspruch 23, bei dem das mindestens eine optische Element translatorisch in einer
15 zur optischen Achse senkrechten Ebene verschoben wird.

26. Das Verfahren nach Anspruch 23, bei dem das mindestens eine optische Element in der Scanrichtung verschoben wird.

27. Das Verfahren nach Anspruch 23, bei dem das mindestens eine optische Element senkrecht zur Scanrichtung
20 verschoben wird.

28. Das Verfahren nach Anspruch 23, bei dem das mindestens eine optische Element um eine Kippachse verkippt wird, die zumindest annähernd senkrecht zu der optischen Achse des Projektionsobjektivs und der Scanrichtung angeordnet ist.

29. Das Verfahren nach Anspruch 23, bei dem das mindestens eine optische Element um eine Kippachse verkippt wird, die die zumindest annähernd senkrecht zu der optischen Achse des Projektionsobjektivs und parallel zu der Scanrichtung angeordnet ist.

30. Das Verfahren nach Anspruch 19, bei dem zusätzlich der Abbildungsmaßstab des Projektionsobjektivs verändert wird.

31. Das Verfahren nach Anspruch 19, bei dem das Projektionsobjektiv ausschließlich Spiegel als abbildende optische Elemente hat.

32. Das Verfahren nach Anspruch 31, bei dem das Projektionsobjektiv mindestens vier Spiegel hat.

33. Ein Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente, umfassend die folgenden Schritte:

- a) Bereitstellen eines Trägers, auf den zumindest teilweise eine Schicht aus einem lichtempfindlichen Material aufgebracht ist;
 - b) Bereitstellen eines Retikels, das abzubildende Strukturen enthält;
 - c) Bereitstellen einer Projektionsbelichtungsanlage mit einem Projektionsobjektiv;
 - d) Korrektur einer Verzeichnung des Projektionsobjektivs gemäß dem Verfahren nach Anspruch 1 oder nach
10 Anspruch 19;
 - e) Projizieren wenigstens eines Teils des Retikels auf einen Bereich auf der Schicht mit Hilfe der Projektionsbelichtungsanlage.
34. Ein mikrostrukturiertes Bauelement, das nach einem
15 Verfahren nach Anspruch 33 hergestellt ist.
35. Ein Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage mit einem Manipulator, mit dem zur Korrektur einer im wesentlichen antisymmetrischen quadratischen Verzeichnung ein Retikel, ein Träger
20 oder beides um eine Drehachse verdrehbar ist, die zumindest annähernd parallel zu einer optischen Achse des Projektionsobjektivs angeordnet ist, wobei das Verhältnis zwischen der Korrektur der Verzeichnung und dem von dem

Manipulator erzeugten Drehwinkel größer ist als 1,5
nm/prad.

Zusammenfassung

=====

Zur Korrektur von Anamorphismus bei einem Projektions-
objektiv einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage für Wafer

- ~~Wird vorgeschlagen, das zu projizierende Muster tragende~~
Retikel und vorzugsweise auch den Wafer um einen kleinen
5 Winkel um eine Achse zu verkippen, die senkrecht auf der
Achse A des Objektivs und senkrecht auf der Scanrichtung
steht und jeweils durch die Mitte des auf dem Retikel
bzw. dem Wafer erzeugten Lichtfeldes steht. Zur Korrektur
einer im wesentlichen antisymmetrischen quadratischen
10 Verzeichnung wird das Retikel und/oder der Träger statt
dessen um eine Drehachse verdreht, die zumindest annä-
hernd parallel zu einer optischen Achse des Projektions-
objektivs angeordnet ist.